

У ДК 624.04**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ
ЗДАНИЙ В ПК ЛИР А-САПР****Городецкий А.С., Водопьянов Р.Ю., Палиенко О.И.**

В настоящее время наблюдается активное возрождение крупнопанельного домостроения. В первую очередь это связано с экономическими причинами.

«Крупнопанельное домостроение остается самым быстрым и экономичным!» – таково мнение профессионального сообщества, обсуждавшего задачи и перспективы отрасли в Санкт-Петербурге на IV Международной научно-практической конференции «Развитие крупнопанельного домостроения в России-InterConPan-IV».

В годы строительного бума коммерческое монолитное жилье, несмотря на более высокую стоимость, привлекало застройщиков и потребителей преимуществами повышенной этажности и свободной планировки. Однако, в текущей экономической ситуации застройщики вынуждены искать способы сократить издержки. Проблемы жилищной необеспеченности и материальных возможностей населения обуславливают повышенный спрос на жилье эконом-класса, причем не только в секторе государственного финансирования строительных программ, но и в секторе частных инвестиций.

Таким образом, ситуация заставляет нас обратиться к быстровозводимым зданиям из элементов заводской готовности. Т.е. второе дыхание крупнопанельного (и вообще сборного) домостроения связано с потребностью в недорогом жилье, возводимом в самые короткие сроки и с сохранением высокого качества работ.

На современном уровне развития строительных технологий могут быть решены многие известные проблемы крупнопанельных зданий. Так, например, применение новых материалов (легких бетонов, эффективных утеплителей и т.п.) позволяет повысить энергоэффективность и долговечность здания. А применение новых подходов к объемно-планировочным решениям (например, широкий шаг несущих конструкций [7]) позволяет успешно решать проблемы «морального» старения жилых зданий, обеспечивает возможность получения гибкой и свободной планировки. Кроме того, активно развиваются варианты решения конструктивных узлов крупнопанельных зданий. Так уже давно появились варианты решения вертикальных стыков без сварки на базе различных петлевых стыков. И даже уже появляются стандарты организации для таких узлов, например – СТО 36554501-026-2012 [4]. Такие решения позволяют сделать конструкцию в целом гораздо надежнее. И воспринимать значительные усилия, возникающие от сейсмических воздействий или от прогрессирующего разрушения. Что, в том числе, позволяет расширить область строительства крупнопанельных зданий повышенной этажности на сейсмические районы.

О «втором дыхании» строительства панельных зданий можно судить и по разработке новых норм СП «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования» (Проект, Вторая редакция) [1], что лишь подчеркивает острую актуальность вопроса.

Для того чтобы проектировать и выполнять прочностные расчеты таких конструкций, исследовать различные варианты объемно-планировочных и конструктивных решений, нужны удобные многофункциональные инструменты – программные комплексы. Таким программным комплексом является ПК Ли́ра-САПР.

Как и многие другие комплексы, ПК Ли́ра-САПР позволяет задать сложную геометрию конструкций, учесть физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности, поэтапность возведения (монтаж), учесть работу естественного и свайного основания и многие другие факторы.

В новой версии ПК Ли́ра-САПР 2017 предложен специальный инструмент для эффективного моделирования и расчета стыков крупнопанельных зданий. Почему это важно?

С точки зрения моделирования строительных конструкций для прочностного расчёта основное отличие сборных зданий от монолитных состоит в наличии в них особой сущности – стыка сборных элементов и необходимости его адекватного представления в расчётной схеме. Для крупнопанельных зданий это: вертикальный стык между стеновыми панелями (может быть свободным, без связей по высоте этажа, а может содержать точечные закладные детали, шпонки или непрерывные омоноличенные петлевые или сварные стыки) и горизонтальный стык между стеновыми панелями и плитами перекрытий (так же может иметь разную конструкцию: платформенный, контактный, монолитный, см. [1]).

Жесткостные и прочностные характеристики стыка определяют многие факторы. Например: марка раствора, заполняющего стык, величины зазоров между панелями, наличие, способ размещения и характеристики закладных деталей и многое другое.

На сегодня уже существовали технологии, обеспечивающие адекватное представление конструкции здания из сборного железобетона для прочностного расчёта в ПК ЛИРА-САПР и других программных комплексах. Однако, все они достаточно трудоёмки, требуют большого количества кропотливой работы для формирования расчётной схемы, в особенности, в области стыков панелей. Ряд примеров моделирования, например, платформенного стыка (горизонтальный стык панелей), представлен в работах Г.И. Шапиро [5, 6].

Созданные таким образом схемы обычно трудно редактировать. Поэтому эксперименты, связанные с изменением типа стыка или его жесткостных характеристик, являются очень трудоёмкими, требуют много времени, высокой квалификации проектировщика и очень внимательного отношения к мельчайшим деталям.

Зная обо всех трудностях, с которыми сталкиваются проектировщики зданий из сборного железобетона, коллектив разработчиков в ходе работ над версией ЛИРА-САПР 2017 уделил особое внимание этим задачам, и предложил новаторские технологические решения.

В частности, разработан специальный класс информационных объектов – «стык панелей». Стык панелей – это параметрически управляемый элемент модели, наделённый интеллектом. Благодаря чему, существенно упрощается процесс назначения стыков в проекте, а процесс редактирования их характеристик (для перебора вариантов конструктивных решений, например) не занимает много времени. Каждый стык сам «знает», в каких ситуациях и для каких кон-

фигураций стыковки панелей он подходит. Благодаря этому стыки сами находят свои места в пространстве модели и размещаются в автоматическом или в автоматизированном режиме. Пользователь-конструктор может наглядно контролировать типы стыков, обозначаемые марками и цветами, назначать им параметры, определяющие их жесткостные характеристики.

С помощью специального диалога (см. рис. 1) пользователь может самостоятельно создавать новые типы стыков, формировать из них библиотеки, переносить из проекта в проект, передавать в виде файлов на другие рабочие места.

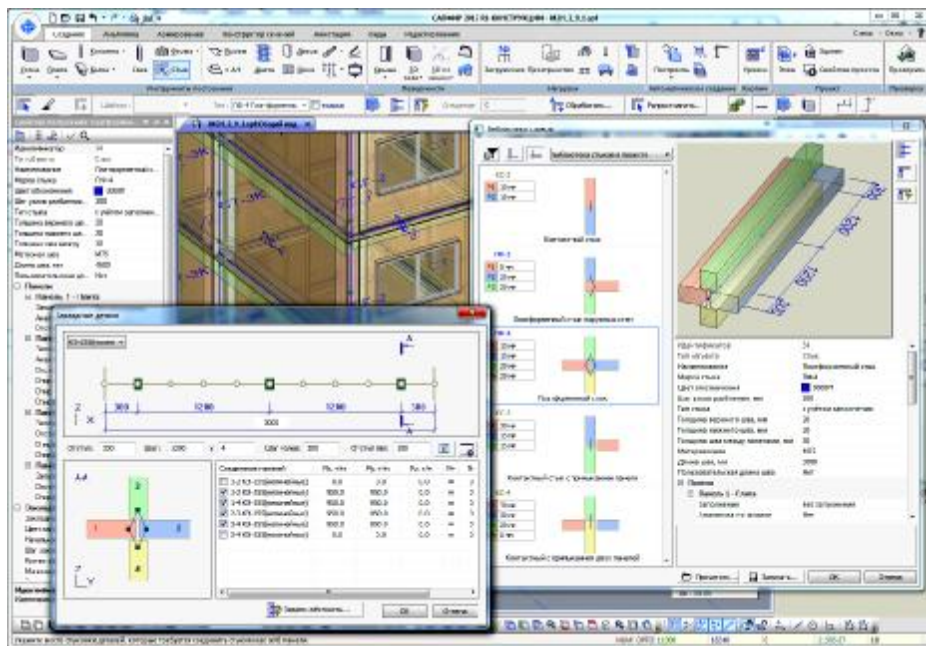


Рисунок 1 - Библиотека стыков в препроцессоре САПФИР (ПК ЛИРА-САПР)

Предусмотрен ряд предустановок, что позволяет получать различные варианты стыковки деталей в конечно-элементной расчётной схеме. В частности, стык может быть свободным, шарнирным, жёстким или с заполнением специализированными конечными элементами, моделирующими контактный или платформенный стык панелей.

Для каждого типа стыка конструктор может определить способ представления его в расчётной схеме, задать шаг размещения узлов для разбивки на конечные элементы, выбрать тип конечных элементов, которыми представлен стык, назначить характеристики элементов. Для моделирования платформенного стыка разработаны специальные типы конечных элементов, которые позволяют решать прочностные задачи в линейной и нелинейной постановке.

В качестве исходных данных для проектирования может использоваться информационная модель здания, сформированная в САПФИР (препроцессор ПК Лира-САПР), импортированная из других программ посредством IFC или созданная в автоматизированном режиме на базе плоских поэтажных планов, представленных в формате DXF. Многообразие вариантов обеспечивает удобство интеграции новых инструментов в существующие технологические цепочки проектирования, выстроенные в организациях пользователей на базе программных средств других разработчиков. Такой подход, в том числе, способствует внедрению BIM-технологий в проектировании.

Если модель здания изначально создана как монолитная без учёта разрезки на панели, можно воспользоваться новыми инструментами ручной и автоматической разрезки. Стены и плиты разрезаются с учётом примыкающих к ним стен и/или с учётом расположения координационных строительных осей (см. рис. 2). В режиме ручной разрезки динамически отображается расстояние от края панели, которое можно задать в цифровом виде, чтобы отрезать панель определённого размера. Предусмотрен режим нарезки панелей с заданным отступом, что позволяет быстро разрезать деталь на панели одинакового размера.

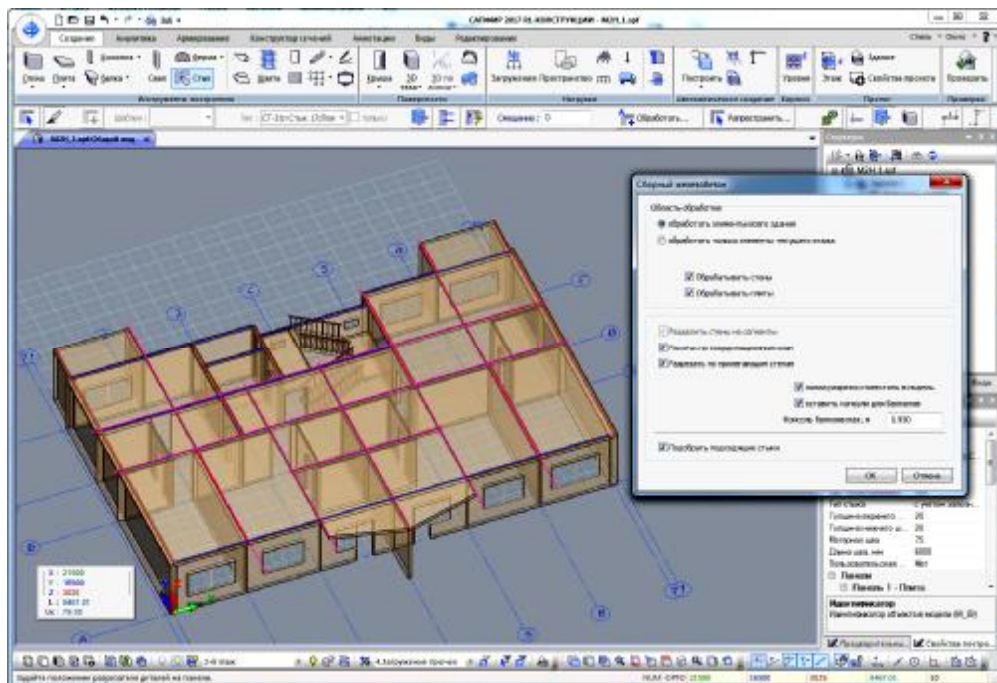


Рисунок 2 - Авторазрезка «монолитного» здания на отдельные сборные панели

Затем конструктор может выбирать стыки из библиотеки и размещать их в модели. Экземпляр, размещаемый в модели, наследует от библиотечного прототипа полный набор параметров, включая характеристики связей по закладным деталям. При этом ряд параметров доопределяется автоматически в зависимости от соединяемых деталей: стык воспринимает толщины панелей, длину области контакта. Экземпляр стыка соединяет панели и влияет на их взаимную подрезку. Заданные в описании стыка толщины швов между панелями заставляют торцы панелей раздвинуться от их исходного положения и тем самым отразить в физическом представлении модели реальную картину стыковки. При генерации конечных элементов стыка автоматически учитывается наличие проёмов в стыкуемых деталях в зоне стыка (см. рис. 3).

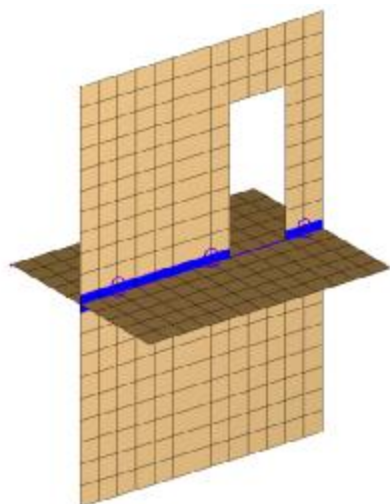


Рисунок 3 - Генерация МКЭ-модели платформенного стыка с учетом наличия проёма

Стыки в модели можно выделять, указывая, как любые другие элементы проекта. Для любого экземпляра стыка, представленного в модели, конструктор может индивидуально отредактировать характеристики, задать толщины швов, настроить положение и свойства закладных деталей. Можно даже графически отредактировать длину стыка, перемещая контрольные точки на концах оси стыка, ограничить зону стыковки. Среди свойств закладных деталей представлены их жесткостные характеристики. Изменения в параметрах стыка можно быстро распространить на однотипные или родственные экземпляры стыков в модели или занести стык с заданным набором характеристик в библиотеку для использования в дальнейшем в этом или в других проектах.

Мощные инструменты фильтрации элементов модели, как универсальные, так и специально ориентированные на обработку стыков, позволяют выделять экземпляры стыков для редактирования и осуществлять групповые модификации свойств в рамках всего проекта, выбранного этажа, в пределах вертикальных плетей, в рамках заданной марки и т.п.

Для закладных деталей также можно выбрать способ представления в расчетной схеме, назначить жесткостные характеристики как для линейного, так и для нелинейного расчета, задать параметры размещения в стыке.

Позиции узлов для разбивки на конечные элементы вдоль оси стыка согласуются с позициями закладных деталей и динамически учитывают позиции проёмов при их наличии в прилегающих к стыку панелях. Если перенести проём в физическом представлении, то не нужно ни пересоздавать стык, ни редактировать его характеристики – изменения автоматически проявятся при регенерации аналитического представления модели проекта.

Выше описана технология создания модели крупнопанельного здания для последующей триангуляции и получения адекватной конечно-элементной модели. А теперь поговорим непосредственно о конечных элементах, моделирующих стыки.

Основные положения по расчету панельных зданий на эксплуатационные нагрузки и вычислению податливостей стыков представлены в проекте нового СП «Крупнопанельные конструктивные системы...» [1] и «Пособии по проектированию жилых зданий...» [2], а так же в работах [3-6]. И если с моделированием точечного стыка по закладным всё достаточно просто (по сути это локальная связь конечной жесткости – пружина, в ПК Лира-САПР это двухузловой конечный элемент КЭ-55), то с моделированием горизонтального (контактного, платформенного) стыка всё гораздо сложнее.

В настоящий момент существует несколько методик учета работы контактного/платформенного стыка в расчетной схеме крупнопанельного здания:

1. модель эквивалентного столба, когда локальная податливость растворных швов и плиты перекрытия равномерно "размазывается" по высоте стеновой панели (этот способ упрощает построение КЭ-модели, но привносит в расчетную схему ряд неточностей, что показано в [1]);

2. модель дискретных связей конечной жесткости (описано, например, в [2] - данный подход уточняет поведение стыка в расчетной схеме здания, но существенно усложняет создание модели, поскольку ведет к значительному увеличению типов жесткостей дискретных связей - для каждого типа стыка и шага КЭ отдельная жесткость, что влечет за собой и большое количество вычислений "вручную", и усложняет контроль заданных исходных данных).

Среди существенных недостатков данных моделей – невозможность корректного учета нелинейного поведения стыка в первом случае, и крайняя сложность учета нелинейности во втором (фактически учет нелинейных эффектов сводится к серии последовательных расчетов с ручной корректировкой жесткостей стыка на каждой итерации).

Чтобы избежать перечисленных недостатков в новой версии ПК Лира-САПР 2017 вводятся новые типы пластинчатых конечных элементов специально для моделирования горизонтального стыка панелей. Предварительно, это: КЭ-59 для учета линейного поведения стыка, и КЭ-259 для учета физически нелинейной работы. По форме элемента они могут быть как прямоугольные, так и треугольные или четырехугольные (что не накладывает каких-то строгих ограничений на геометрию сетки КЭ в области стыка).

В МКЭ-модели платформенный стык моделируется двумя рядами конечных элементов КЭ-59 или КЭ-259 (см. рис. 4). Контактный стык отличается лишь тем, что это один ряд элементов, стыкующий стеновую панель с монолитной фундаментной плитой или ростверком, либо монолитными конструкциями встроенных первых этажей с магазинами, парковками и т.п.

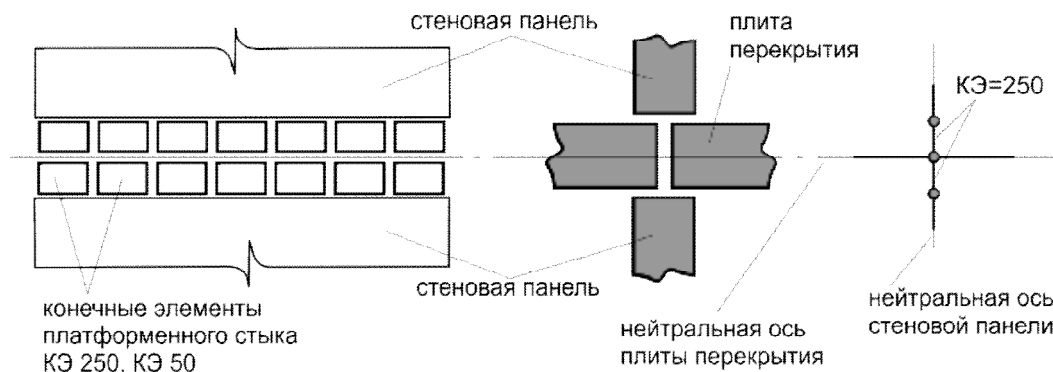


Рисунок 4 - Расчетная схема платформенного стыка с новыми типами КЭ

Для вертикальных (по Z1) и сдвиговых (по X1) усилий и деформаций используются аппроксимирующие функции аналогичные КЭ балок-стенок, но кроме этого из плоскости элемента (по Y1) добавляется сдвиговая жесткость платформенного стыка.

Зависимость σ - ε для построения НДС от вертикальных усилий для нелинейных КЭ стыка представлена на рис. 6 и соответствует положению СП «Крупнопанельные конструктивные схемы...» [1] Приложение А в части изменения податливости стыка в зависимости от напряжений и вообще границ применимости формул для вычисления податливости растворного шва.

В соответствии с [1, 2] коэффициент податливости при сжатии горизонтального растворного шва I_m в зависимости от напряжения определяют по формулам:

$$\text{при } s_{m1} \leq 1,15R_m^{2/3} - I_{m1} = 1,5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m;$$

$$\text{при } s_{m2} \geq 1,15R_m^{2/3} - I_{m2} = 5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m, \text{ но не более } 2R_m^{2/3};$$

где s_m - среднее значение сжимающих напряжений в растворном шве, МПа;

R_m - кубиковая прочность раствора, МПа;

t_m - толщина растворного шва, мм;

I_m - коэффициент податливости растворного шва при кратковременном сжатии, мм³/Н.

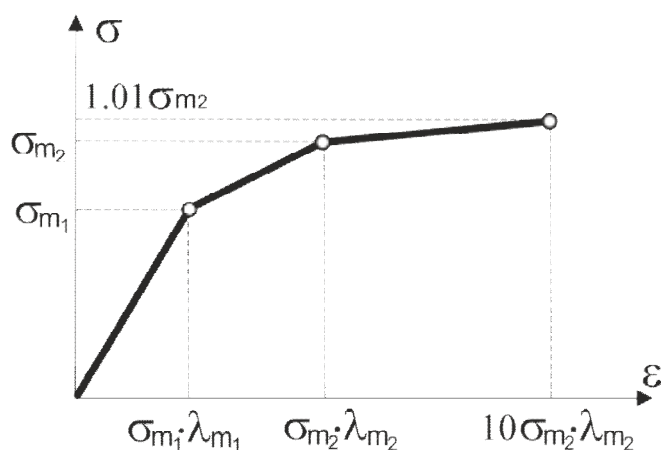


Рисунок 5 - Диаграмма работы специализированного нелинейного типа КЭ-250

Нелинейный расчет может выполняться в двух вариантах:

1. используется итерационный метод по типу «инженерная нелинейность» – для «определяющей комбинации нагрузжений» заданной пользователем в несколько итераций автоматически определяется/уточняется характер работы стыков (наличие отрывов в КЭ стыка приводит к обнулению вертикальных и сдвиговых жесткостей, локальные всплески напряжений в КЭ стыка меняют жесткость элементов по длине стыка), а затем производится расчет на все загрузки с вычислением комбинаций РСН и РСУ, т.е. выполняется традиционный линейный расчет (но уже с модифицированной матрицей жесткости панельного здания);

2. используется шаговый метод, т.е. моделируется последовательный процесс нагружения, в рамках которого по шагам накапливаются нелинейные эффекты (данный метод позволяет довести конструкцию до разрушения, т.е. позволяет моделировать такие воздействия как прогрессирующее разрушение).

В результате расчета панельного здания выдается деформированная схема, изополя и мозаики напряжений и усилий в стыках и отдельных связях по закладным. Кроме того, используя новый функционал версии Лира-САПР 2017 «Расчет каменных и армокаменных конструкций», можно получить суммарные нагрузки на отдельные стеновые панели, как на бетонные простенки, что существенно облегчает последующую проверку несущей способности панелей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования» (Проект, Вторая редакция).
2. Пособие по проектированию жилых зданий Вып. 3 Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). М. 1989 г.
3. СН 321-65 «Указания по проектированию конструкций крупнопанельных жилых домов».
4. Пособие по расчету крупнопанельных зданий. Выпуск 1 Жесткостные характеристики. М. 1974 г.
5. ВСН 32-77 «Инструкция по проектированию конструкций панельных жилых зданий».
6. СТО 36554501-026-2012 «Рекомендации по расчету и конструированию жилых крупнопанельных домов на тросовых петлевых соединениях и многопустотными плитами».
7. Шапиро, Г.И. К вопросу о построении расчетной модели панельного здания / Г.И. Шапиро, Р.В. Юрьев // Журнал «Промышленное и гражданское строительство». – 2004. – №12.
8. Шапиро, Г.И. Расчет зданий и сооружений в МНИИТЭП / Г.И. Шапиро, А.А. Гасанов, Р.В. Юрьев // Журнал «Промышленное и гражданское строительство». – 2007. – №6.
9. Коршунов, А.Н. Сочетание в одной крупнопанельной блок-секции узкого и широкого шагов поперечных несущих стен» / А.Н. Коршунов // Журнал «Жилищное строительство». – 2016. – № 10 2016 г.